



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**AKKUJEN JA SUPERKONDENSAATTORIEN YHTEISKÄYTTÖ
ENERGIAVARASTOINA JA NIIDEN VERKKOON LIITTÄMINEN
AJONEUVOISSA**

**(Integrated use of batteries and ultracapacitors as energy storages in vehicles and
their network connection)**

Miikka Eskola

TIIVISTELMÄ

LUT Energia

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Miikka Eskola

Akkujen ja superkondensaattorien yhteiskäyttö energiavarastoina ja niiden verkkoon liittäminen ajoneuvoissa

Kandidaatintyö 2010

41 sivua, 26 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Hakusanat: energiavarasto, akku, superkondensaattori, hakkuri, invertteri

Ajoneuvojen tiukentuneet päästörajoitukset, sekä ajoneuvojen kokonaisyötysuhteen parantamisen tarve ohjaavat ajoneuvovalmistajia kehittämään uusia ratkaisuja.

Energiavarastojen käyttö ajoneuvoissa on yleistynyt ja niiden käytöllä voidaan saada huomattava energiasäästö.

Tässä kandidaatintyössä on esitelty erilaisia energiavarastoja ja niiden verkkoon liittämistä. Pääpaino työssä on akkujen ja superkondensaattorien rinnankytkennässä. Energiavarastot pyritään kytkemään mahdollisimman vähällä tehoelektronikalla verkkoon. Esimerkkitapaukseksi on otettu litium-ioni akkujen ja superkondensaattorien rinnankytkentä vaihtojännitteeseen pelkällä invertterillä.

ABSTRACT

LUT Energy

Degree Programme in Electrical Engineering

Miikka Eskola

Integrated use of batteries and ultracapacitors as energy storages in vehicles and their network connection

Bachelor's thesis 2010

41 pages, 26 pictures and 2 tables

Examiners: Research Scientist Lasse Laurila

Keywords: energy storage, battery, supercapacitor, converter, inverter

Vehicles emission limits have tightened and it has driven vehicle manufacturers to develop new solutions. The use of energy storages in vehicles has become more general. Energy storages can lead to a large amount of energy savings.

In this bachelor's thesis different energy storages and their grid connection are studied, especially batteries and supercapacitors parallel connection. Energy storages are connected to the grid with minimal power electronics. The example case deals with lithium-ion batteries and supercapacitors parallel connection to AC- voltage only by one inverter.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	3
2 ENERGIAVARASTOJEN VERTAILUA.....	6
2.1 Akut	7
2.1.1 Lyijyakku	7
2.1.2 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd).....	7
2.1.3 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH).....	8
2.1.4 Litium-ioniakku (Li-ion).....	8
2.1.5 Litium-polymeeriakku (LiPo).....	9
2.1.6 Litium-titanaattiakku	9
2.2 Superkondensaattorit	9
2.3 SMES.....	11
2.4 Vauhtipyörät	11
2.5 Paineakut	12
2.6 Energiavarastojen yhteenveto.....	13
3 ENERGIAVARASTOJEN VERKKOON-LIITTÄMISTEKNIIKAT	14
3.1 DC-DC hakkurit	15
3.2 Taajuusmuuttajat	16
3.2.1 Invertteritopologiat	16
3.2.2 DC-AC invertterien vertailua.....	20
3.3 Eri rinnankytkentävaihtoehtoja	22
3.3.1 DC-DC kytkentä	22
3.3.2 DC-AC kytkentä DC-DC hakkurilla.....	24
3.3.3 DC-AC kytkentä pelkällä invertterillä.....	27
3.4 Esimerkkitapaus	28
4 YHTEENVETO	31
LÄHTEET.....	32

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

V_{control} Sinimuotoinen tulosaignaali

V_{tri} Kolmioaalto

LYHENTEET

AC Alternating Current

DC Direct Current

DOD Depth of discharge

HTS High Temperature Superconducting

IMO International Maritime Organisation

Li-ion Lithium-ion

LiPo Lithium Polymer

LTS Low Temperature Superconducting

NiCd Nickel-cadmium

NiMH NickelMetallHydrid

PWM Pulse Width Modulation

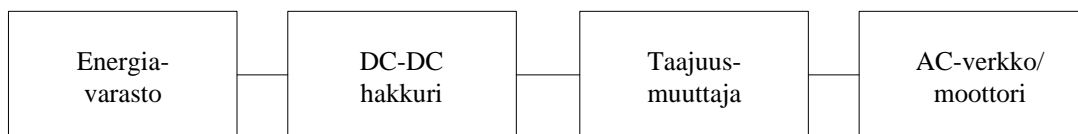
SMES Superconducting Magnetic Energy Storage

1 JOHDANTO

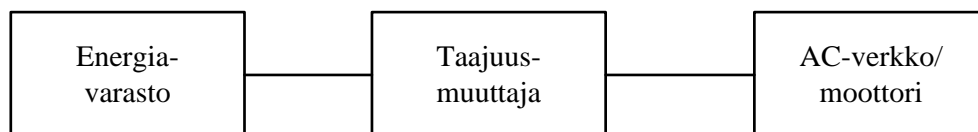
Tässä kandidaatintyössä tutkitaan käytännön sovelluskohteita joissa voitaisiin käyttää erilaisia energiavarastoja tasaamaan kuormituksen muutoksia. Työssä tutkitaan erilaisten energiavarastojen ominaisuuksia, jotta voidaan päätellä niiden perusteella mitkä ovat parhaimmat varastot eri sovelluskohteisiin. Keskitytään tutkimaan akkujen ja superkondensaattoreiden rinnankytkentää. Tutkitaan myös energiavarastojen liittämistä käytettävään sähköverkkoon. Tavoitteena on esittää menetelmiä, joilla energiavarastot saadaan liitettyä sähköverkkoon mahdollisimman vähällä tehoelektroniikalla hyötysuhteen maksimoimiseksi. Kuvassa 1.1 on periaatekuva energiavaraston liittamisestä tehoelektroniikan avulla DC-verkkoon tai moottoriin. Kuvista 1.2 ja 1.3 nähdään periaatekuvat energiavaraston liittamisestä tehoelektroniikan avulla AC-verkkoon tai moottoriin.



Kuva 1.1. Energiavaraston kytkeminen DC -verkkoon tai DC -moottoriin.



Kuva 1.2. Energiavaraston kytkeminen DC-DC hakkurin ja taajuusmuuttajan avulla AC -verkkoon tai AC -moottoriin.



Kuva 1.3. Energiavaraston kytkeminen pelkällä taajuusmuuttajalla AC -verkkoon tai AC -moottoriin.

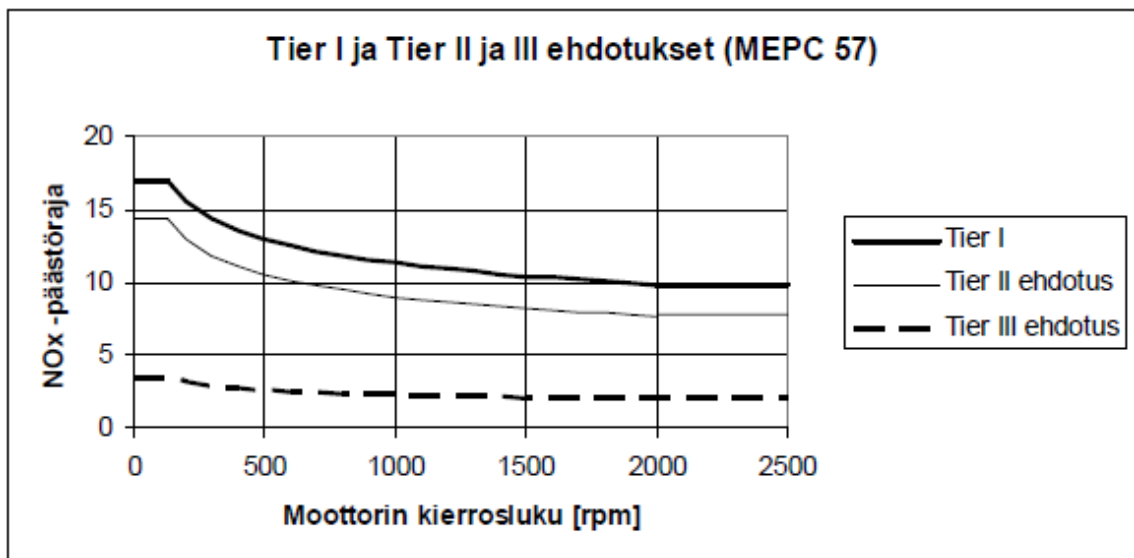
Energiavarastoja voidaan käyttää kiinteässä sähköverkossa varavoimanlähteenä takaamaan energiansaanti vikatilanteessa tai leikkaamaan huipputehopiikkejä. Nämä verkkosovellukset ovat erittäin korkeille tehoille jopa 100 MW.

Energiavarastoja käytetään myös monissa ajoneuvosovelluksissa. Sähköautoissa kaikki auton tarvitsema energia eli moottorin energia ja lisälaitteisiin menevä energia otetaan energiavarastoista, yleisimmin akuista. Sähköajoneuvossa energiavarastot pitää suunnitella koko ajoneuvon energiatarpeen mukaan. Hybridiajoneuvoissa perinteisen pelkän polttomoottorin lisäksi siihen on lisätty sähkömoottori, joka saa tarvitsemansa energian energiavarastoista. Nykyiset päästörajoitukset pakottavat ajoneuvovalmistajat kehittämään tapoja pienentää ajoneuvojen päästöjä ja dieselkoneen pienennys on yksi erittäin lupaava tapa. Toinen tapa on säätää dieselkone toimimaan pienemmän kulutuksen alueella. Energiavarastoilla voidaan myös ottaa talteen ajoneuvosta muuten hukkaan menevää energiaa kuten jarrutusenergiaa tai potentiaalienergiaa ja tämän avulla parantaa ajoneuvon kokonaisyötysuhdetta ja energiataloutta. Ajoneuvosovellukset keskittyvät yleisesti maksimissaan muutamiin satoihin kilowatteihin. Suuritehoisimpia ajoneuvosovelluksia ovat erilaiset liikkuvat työkoneet. Lähiaikoina dieselkäyttöisten työkoneiden päästöraajat ovat tiukentuneet. Tämänhetkiset päästörajoitukset dieselkäyttöisille työkoneille voidaan nähdä taulukosta 1.1 (Valtioneuvosto 2005). Dieseltyökoneiden päästörajoitukset eivät koske alle 19kW tehoja eivätkä yli 560kW tehoja (Valtioneuvosto 2005).

Taulukko 1.1. Dieselkäyttöisten työkoneiden päästörajoitukset.

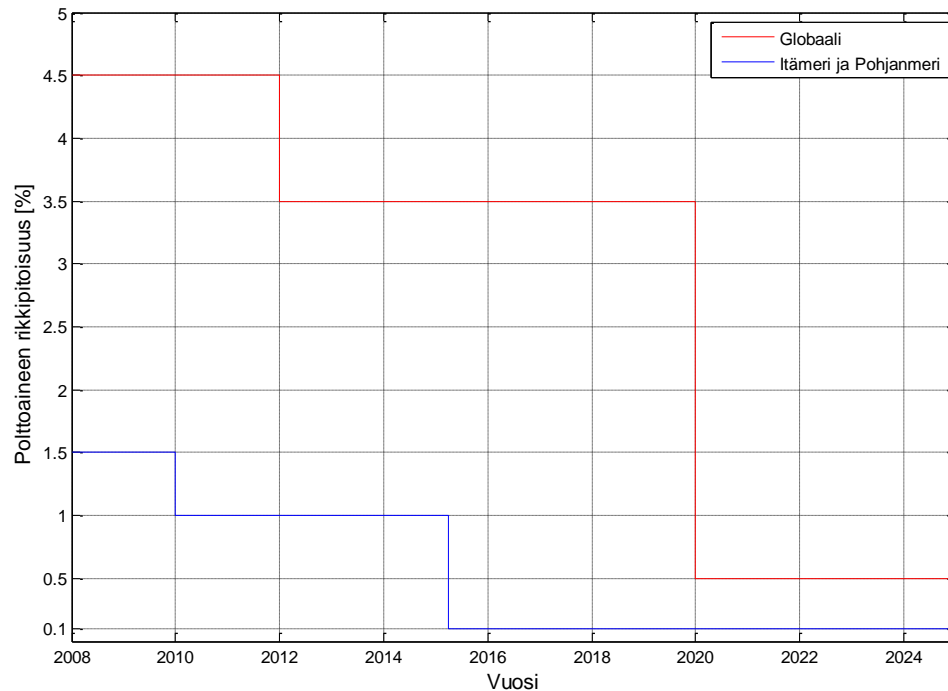
Moottoriteho P [kW]	Hiilimonoksidi [g/kWh]	Hiilivedyt ja typen oksidit yhteensä [g/kWh]	Hiukkaset [g/kWh]
130≤P≤560	3.5	2.19	0.025
75≤P<130	5	4	0.3
37≤P<75	5	4.7	0.4
19≤P<37	5.5	7.5	0.6

Energiavarastoja käytetään myös laivasovelluksissa. Sukellusveneissä akut toimivat varavoimanlähteenä dieselkoneen rinnalla. Uudet tiukentuneet päästörajoitukset koskevat myös laivoja, jolloin myös niiden valmistajien täytyy ruveta miettimään keinoja päästöjen pienentämiseen. Laivojen päästörajoitukset määrää International Maritime Organization (IMO). Kuvasta 1.4 nähdään laivojen nykyiset päästörajat, sekä tulevaisuudelle ehdotetut päästörajat typenoksideille. Kuvassa 1.4 olevat merkinnät: Tier I on nykyään voimassa oleva päästöraja ja koskee vuoden 2000 jälkeen asennettuja laivamoottoreita. Tier II koskee yli 130 kW laivamoottoreita jotka on asennettu vuoden 2011 jälkeen. Tier III koskee yli 130 kW laivamoottoreita jotka on asennettu vuoden 2016 jälkeen. Lisätietoja päästörajoista ja niihin liittyvistä poikkeuksista löytyy IMO:n sivuilta. (Kämäräinen 2008), (IMO 2008).



Kuva 1.4. Laivojen päästörajat typenoksideille (Kämäräinen 2008).

Laivoilla käytettävälle polttoaineelle on myös asetettu rikkipitoisuus rajat, joilla pyritään vähentämään rikinoksidipäästöjä ja muita pienhiukkaspäästöjä. Rikkipitoisuusrajat on määritelty globaalisti, mutta Itämerellä ja Pohjanmerellä on vielä omat tiukemmat rajat. (Kämäräinen 2008), (IMO 2008). Nämä polttoaineiden rikkipitoisuus-rajat voidaan nähdä kuvasta 1.5



Kuva 1.5. Laivoissa käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuusrajat.

Tyypillisesti laivat käyvät dieselmoottorilla ja suurimmat päästöt tulevat nopeissa kuormituksen muutoksissa eli yleensä satamien läheisyydessä. Eräänä ajatuksena on ollut sisällyttää laivoihin energiavarastoja joista saatavaa energiaa käytettäisiin nopeissa kuormituksen muutoksissa jolloin niissä syntyvät ylimääräiset päästöt poistuisivat. Nämä laivoihin suunnitellut energiavarastot olisivat muutamista megawateista useisiin kymmeneen megawatteihin.

2 ENERGIAVARASTOJEN VERTAILUA

Energiavarastoilla on monenlaisia ominaisuuksia joiden avulla niitä voidaan vertailla keskenään, kuten energiatiheys, tehotiheys, hyötysuhde, jännite, itsepurkautumisnopeus, lataussyklien määrä, elinikä, latausaika, turvallisuus, ympäristötekijät ja hinta. Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia energiavarastoja ja perehdytään niiden ominaisuuksiin.

2.1 Akut

Akut ovat suhteellisen vanha energiavarastotyyppi, ensimmäinen uudelleenladattava lyijyakku keksittiin jo vuonna 1860 (Electropedia 2005). Akuilla on melko suuri energiatiheys mutta pienehkö tehotiheys. Akkuja käytetäänkin tyypillisesti sovelluksissa joissa tarvitaan pitkäaikaista energian käyttöä tai talteenottoa, mutta ei kovin suurta tehoa. Akkukennojen tyypillinen nimellisjännite on 2-12 V. Suurempia jännitetasoja saavutetaan sarjaankytkennöillä akkumoduuleissa. (Alanen 2003).

2.1.1 Lyijyakku

Lyijyakku on vanhin akkutyyppi. Lyijyakut ovat halpoja ja tästä johtuen ne ovat erittäin paljon käytettyjä. Lyijyakuilla on kuitenkin melko huono energiatiheys 25–50 Wh/kg ja tehotiheys on 75–130 W/kg (Thermoanalytics 2007), (Buchmann 2003). Lyijyakkujen hyötysuhde on ~80 % (Joshi 2006). Lyijyakkujen ominaisuudet ovat erittäin riippuvaisia toimintalämpötilasta. Lämpötilan laskiessa lyijyakun ominaisuudet huononevat ja saatava energia pienenee huomattavasti. Lyijy on myös myrkyllinen aine ja täytyy kierrättää asianmukaisesti. Lyijyakkujen elinikä on melko pieni, vain joitain satoja latauskertoja. Lyijyakkujen eräs huono puoli on niiden suhteellisen suuri massa, joka johtuu lyijyn suuresta tiheydestä. Lyijyakun kennojännite on tyypillisesti 2 V ja kaupallisten lyijyakkujen käyttöjännite on yleisimmin 12 V.

2.1.2 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)

Nikkeli-kadmiumakun energiatiheys on hiukan suurempi kuin lyijyakuilla eli 35–80 Wh/kg ja tehotiheys on 50–200 W/kg (Thermoanalytics 2007), (Buchmann 2003). Nikkeli-kadmiumakkujen hyötysuhde on ~80 % eli samaa luokkaa kuin lyijyakuilla. Nikkeli-kadmiumakkujen hyviä ominaisuuksia ovat suuri lataussyklien määrä (>1000), vakio purkausjännite, suuri purkausnopeus, hyvä kylmänkestävyys ja pieni itsepurkautumisnopeus. Nikkeli-kadmiumakun huono puoli on muistiominaisuus. Nikkeli-kadmiumakut ovatkin hyviä pitkäaikaisia energiavarastoja. Nikkeli-kadmiumsolan jännite on 1.2 V, joten niitä tarvitaan lyijykennoja enemmän sarjaan,

jotta saavutetaan yleisemmin käytetty 12 V jännite. Kadmium on myös myrkyllinen aine. Nikkeli-kadmiumakut ovat nykyään usein korvautuneet kehittyneemmillä akkutyypeillä.

2.1.3 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

Nikkeli-metallihydridiakun energiatiheys on melko hyvä 50–120 Wh/kg ja tehosiheys on 150–250 W/kg (Thermoanalytics 2007), (Buchmann 2003). Nikkeli-metallihydridiakujen hyötysuhde ~65 % (Joshi 2006) on melko vaatimaton verrattuna muihin akkuihin. Nikkeli-metallihydridiakujen kennojännite on 1.2-1-3 V, ne ovat myös ympäristöystävällisiä koska niissä ei ole myrkyllisiä aineita. Tästä myrkyttömyydestä, samasta kennojännitteestä ja vähemmästä muistiominaisuudesta johtuen nikkeli-metallihydridiakkuja on vaihdettu yleisesti nikkeli-kadmiumakkujen tilalle. Nikkeli-metallihydridiakujen latauskertojen määrä (<1000) on pienempi kuin nikkeli-kadmiumakkujen.

2.1.4 Litium-ioniakku (Li-ion)

Litium-ioniakkujen käyttö aloitettiin 1990-luvulla ja niiden käyttö on kasvanut 2000-luvulla erittäin nopeasti. Litium-ioniakut jaetaan tyypillisesti kolmeen kategoriaan riippuen käytetyistä materiaaleista, nämä ovat litium-koboltti-, litium-mangaani- ja litium-rautafosfaattiakku (Buchmann 2003). Litium-ioniakkujen energiatiheys on melko korkea verrattuna muihin akkutyypeihin 90–190 Wh/kg ja tehosiheys on 300-1000 W/kg (Thermoanalytics 2007), (Buchmann 2003), (Immonen 2008). Litium-ioniakkujen hyötysuhde on erittäin hyvä, yli 95 %. Litium-ionisolun jännite on korkeampi kuin muilla akkutyypeillä 2.5–4.2 V. Litium-ioniakkujen latauskertojen määrä on melko korkea 1000–3000. Litium-ioniakut tarvitsevat jonkinlaisen ylilataussuojauksen, koska ne voivat räjähtää ylilatauksesta. Tämä elektroniikka pienentää litium-ioniakkujen luotettavuutta ja nostaa niiden hintaa.

2.1.5 Litium-polymeeriakku (LiPo)

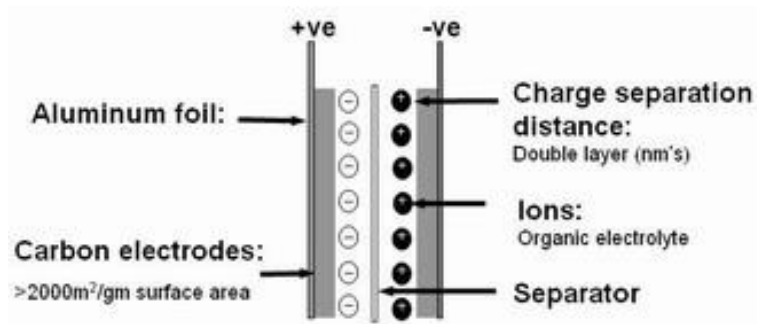
Litium-polymeeriakut ovat ominaisuuksiltaan melko samanlaisia kuin litium-ioniakut. Energiatiheys on 100–150 Wh/kg ja tehosiheys 100–315 W/kg (Thermoanalytics 2007), (Buchmann 2003). Lataussyklien määrä on hiukan pienempi kuin litium-ioniakuilla ~1000. Litiumpolymeeriakkujen hyötysuhde on myös yli 95 %. Litiumpolymeeriakkujen etuna on niiden kevyt ja joustava rakenne. Akku voidaan periaatteessa muotoilla haluttuun muotoon ja voi olla vaikka luottokortin kokoinen. Tästä joustavuudesta johtuen nämä akut ovat suosittuja pienissä kannettavissa laitteissa.

2.1.6 Litium-titanaattiakku

Litium-titanaattiakku on melko uusi akkutyyppe, kehitys on alkanut vasta 2000-luvulla, joten varsinaista massatuotantoa ei vielä ole (Altairno). Litium-titanaattiakun energiatiheys on 60-70 Wh/kg (Burke 2009) ja tehosiheys jopa 4000 W/kg (Altairno). Litium-titanaattiakkujen hyötysuhde on ~90 % (Burke 2009). Lataussyklien määrä >5000 (Burke 2009) on myös huomattavasti korkeampi kuin perinteisillä litium-ioniakuilla ja niiden lataus on erittäin nopeaa, vain joitain kymmeniä minuutteja (Atbatt 2008). Litium-titanaattiakkujen kennojännite 2.4 V on myös pienempi kuin perinteisellä litium-ioniakulla (Burke 2009).

2.2 Superkondensaattorit

Superkondensaattoreita kutsutaan myös pseudokondensaattoreiksi ja ultrakondensaattoreiksi. Kuvassa 2.1 on tyypillisen superkondensaattorin rakenne ja sen sisältämät materiaalit.



Kuva 2.1 Superkondensaattorin rakenne (Cap-xx 2008).

Tyypillisesti superkondensaattorisolun jännite on 0.9-2.7 V riippuen elektrolyytin materiaalista, ja kaupallisten superkondensaattoreiden jännite on 2.1–12 V. Tarvittaessa suurempia jännitteitä, täytyy useampia superkondensaattoreita kytkeä sarjaan tai käyttää DC-DC hakkuria. Kytettäessä enemmän kuin kolme superkondensaattoria sarjaan täytyy käyttää jotain suojapiiriä tarkkailemaan yksittäisten superkondensaattoreiden latautumista.

Superkondensaattorien kapasitanssi voi olla jopa 5000 F (Nesscap 2005). Superkondensaattoreiden energiatiheys 1-10 Wh/kg (Green 2002), (Jurkelo 2006) on melko alhainen verrattuna akkuihin. Superkondensaattoreiden tehosiheys on kuitenkin todella suuri jopa 6 000 W/kg (Green 2002), (Maxwell 2010). Superkondensaattoreiden hyötysuhde on hyvä 90-98 % (Immonen 2008). Superkondensaattoreiden jännite on lineaarinen ja laskee tasaisesti nimellisestä jännitteestä nolnaan. Tästä lineaarisesta laskusta johtuen superkondensaattoreista ei saada kaikkea energiaa käyttöön. Käyttöön saatavan energian määrä riippuu sovelluksen vaatimasta jännitteestä. Tätä ongelmaa voidaan korjata ainakin osittain käyttämällä DC-DC hakkuria, mutta se nostaa systeemin hintaa ja lisää sen häviöitä.

Superkondensaattoreiden lataus on erittäin nopeaa, vain joitain sekunteja tai kymmeniä sekunteja. Latausvirtaa täytyy rajoittaa kun ladataan tyhjää superkondensaattoria. Superkondensaattori on täynnä kun nimellisjännite saavutetaan, eikä mitään ylilataussuojausta tarvita. Ladattaessa useamman kuin kolmen superkondensaattorin sarjaankytkentää täytyy yksittäisten kennojen jännitettä tarkkailla. Superkondensaattoreiden elinikä on noin 10 vuotta ja niitä voidaan ladata lähes

rajattomasti, lataussyklien määrä $\sim 1\,000\,000$ (Green 2002), (Maxwell 2010). Superkondensaattoreiden ongelmana on niiden nopea itsepurkautuminen joka voi olla ~ 5 % vrk.

2.3 SMES

Suprajohtava magneettinen energiavarasto (SMES) on melko uusi energiavarasto systeemi. SMES jaetaan kahteen ryhmään matalan lämpötilan suprajohtava energiavarasto (LTS), jonka toimintalämpötila on alle 20K ja korkean lämpötilan suprajohtava energiavarasto (HTS), jonka toimintalämpötila on 20-70K. Suprajohtava energiavarasto koostuu kelasta joka on suprajohtava ja sen jäähditysjärjestelmästä. Suprajohtavassa kelassa kulkee tasavirtaa joka luo ympärilleen magneettikentän johon energia varastoituu. (VTT 2003)

Niobium-titaaniseos kela on matalanlämpötilan SMES ja sen täytyy toimia alle 4.2K, jotta se on suprajohtava. Matalan lämpötilan suprajohtavat energiavarastot vaativat nestemäisen helium jäähdityksen toimiakseen, joka tekee systeemistä erittäin kalliin. Vismuttiperusteinen kuparioksidikeraami on korkean lämpötilan suprajohtava energiavarasto ja se vaatii nestemäisen typen jäähditykseen.

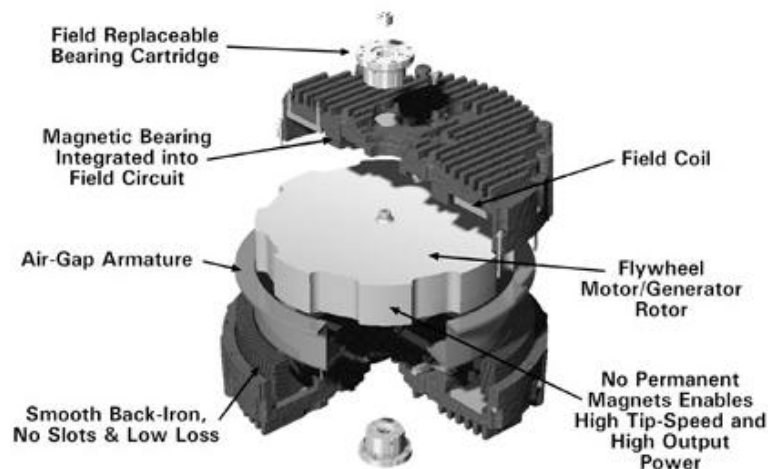
Suprajohtavan magneettisen energiavarasto systeemin tehotiheys on erittäin korkea 1-100 kW/kg, energiatiheys on 4-75 Wh/kg ja sen hyötysuhde on ~ 98 % (Zhang 2009). Suprajohtavat magneettiset energiavarastot ovat erittäin kalliita johtuen niiden vaatimasta jäähdityksestä. Tästä korkeasta hinnasta johtuen ne eivät ole kovin yleisessä käytössä kaupallisissa sovelluksissa.

2.4 Vauhtipyörät

Vauhtipyörät ovat erittäin vanha keksintö. Vauhtipyörä on laite, jossa on metallinen tai komposiittimateriaalista valmistettu kiekko, joka pyörii akselin ympärillä ja varastoi energiaa omaan pyörimisliikkeeseensä. Tyypillisesti vauhtipyörä systeemissä on itse vauhtipyörä ja siihen samalle akselille laitettu sähkömoottori. Ladattaessa varastoa

sähkökone toimii moottorina ja kiihdyttää vauhtipyörän nopeutta ja purkaessa varastoa vauhtipyörän vauhti hidastuu sen pyörittäessä generaattorina toimivaa sähkökonetta.

Vauhtipyörien energiatiheys voi olla 100 Wh/kg ja teholtiheys voi olla 1600 W/kg. Vauhtipyörän hyötysuhde on yli 90 %, kun toimitaan nimellisellä teholla (Ruddell 2003). Vauhtipyörien elinikä on korkea, jopa 100 kertaa akkujen elinikä, ja ne ovat myös kevyitä. Vauhtipyörät ovat lähes huoltovapaita. Hyvänä puolena on myös mahdollisuus purkaa energiavarasto aivan tyhjäksi. Haittapuolena voi olla pyörän vikaantuminen ja koko energiavaraston tyhjeneminen hetkessä, jolloin laite hajoaa ja vauhtipyörä sinkoutuu tangentin suuntaan. Tästä vikaantumisesta johtuen pyörimisnopeuden säätäminen on erittäin tärkeää. Vauhtipyörä on myös melko kallis investointi verrattuna esimerkiksi akkuihin. Kaupallisen vauhtipyörän rakennekuva voidaan nähdä kuvasta 2.2



Kuva 2.2. Vauhtipyörän rakennekuva (Active Power 2007).

2.5 Paineakut

Paineakku voi toimia joko paineilmalla tai hydraulikka-nesteellä. Paineakussa nostetaan paineilman tai hydraulikkanesteen painetta kun energiaa ei tarvita paljoa ja huippukuorma tilanteessa paineakusta otetaan tehoa ulos.

2.6 Energiavarastojen yhteenveto

Kaikki edellä tarkastellut energiavarastot ovat mahdollisia ajoneuvosovelluksissa käytettäväksi. Jokaisella energiavarastolla on omat hyvät ja huonot ominaisuutensa. Taulukkoon 2.1 on kerätty eri energiavarastojen ominaisuuksia vertailun helpottamiseksi.

Taulukko 2.1. Eri energiavarastojen ominaisuuksia.

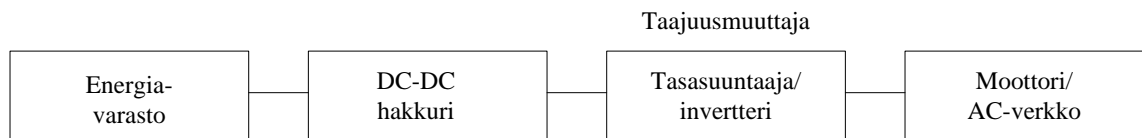
	Energiatiheys [Wh/kg]	Tehotiheys [W/kg]	Hyötysuhde %	Lataussyklien määrä(80% DOD)	Solujännite [V]
Lyijyakku	25-50	75-130	80	200-300	2
Nikkeli- kadmiumakku	35-80	50-200	80	>1000	1.2
Nikkeli- metallihydriakku	50-120	150-250	65	<1000	1.2
Litium-ioniakku	90-190	300-1000	>95	1000-3000	2.5-4.2
Litium- polymeeriakku	100-150	100-315	>95	~1000	2.5-4.2
Litium- titanaattiakku	60-70	4000	~90	>5000	2.4
Superkondensaattori	1-10	<6000	90-98	~1000000(100%DOD)	0.9-2.7
SMES	4-75	1000- 100000	98		
Vauhtipyörä	100	1600	>90	10^5 - 10^7 (100%DOD)	

Taulukosta 2.1 nähdään että suuria tehoja tarvittaviin sovelluksiin sopivat SMES, litium-titanaattiakut, superkondensaattorit ja vauhtipyörät. Suuria energiamääriä tarvittaessa parhaimmaksi vaihtoehdoksi nousevat litium-ioniakut. Energiavaraston valintaan vaikuttavat tietysti myös muut tekijät kuten käytettävissä oleva fyysinen tila, energiavaraston massa ja hinta. Voidaan myös käyttää useampaa erilaista energiavarastoa rinnakkain yhdessä sovelluksessa, jotta saadaan molempien energiavarastojen hyvät ominaisuudet käyttöön (Rufer). Kuten johdannossa jo mainittiin, tässä työssä keskitytään tilanteeseen jossa käytetään litium-ioniakkuja ja

superkondensaattoreita rinnakkain, jolloin saadaan litium-ioniakkujen suuri energiatiheys ja superkondensaattoreiden suuri tehosiheys hyötykäyttöön. Edellä kuvattua rinnankytkentää huonontaa järjestelmän monimutkaisuus, säätämisen vaikeutuu.

3 ENERGIAVARASTOJEN VERKKOON-LIITTÄMISTEKNIIKAT

Energiavarastojen verkkoon liittäminen voidaan jakaa osa-alueisiin, jotka voidaan nähdä kuvasta 3.1



Kuva 3.1. Verkkoon liittämisen osa-alueet.

Tässä työssä käsitellyissä sovelluksissa on yleisimmin AC -verkko tai AC -moottori, johon energiavarastot kytketään. Energiavarastoja voidaan käyttää sähköverkossa vaikka huippukuormien tasaamiseen, jolloin jännitetasot ovat riippuen verkosta 20–400 kV. Työkoneissa energiavarastoja käytetään päästöjen pienentämiseen tai hyötysuhteen parantamiseen. Näissä työkonesovelluksissa energiavarastot kytketään yleensä AC -moottoriin. Työkoneissa käytetään satoja voltteja, mikä on sopiva jännite dieselmoottorin apuna olevalle sähkömoottorille.

AC- verkon jälkeen tulee tasasuuntaaja, jolla AC- verkon vaihtojännite muutetaan tasajännitteeksi energiavarastoja varten. Tasasuuntaaja voi olla kaksisuuntaisen tehonvirtauksen tapauksessa esimerkiksi puolijohdekytkimillä toteutettu kokoaaltosilta (Mohan 2008).

Tasasuuntauksen jälkeen tarvitaan yleensä DC-DC hakkuri, jolla saadaan nostettua tai laskettua jännitteen amplitudia halutuksi. DC-DC hakkuri ei ole pakollinen, jos jännitteen amplitudi on valmiiksi halutun suuruinen. DC-DC hakkuritopologioita on

erittäin paljon ja käytettävän hakkurin valinta riippuu erittäin paljon kyseessä olevan sovelluksen ominaisuuksista (Mohan 2008).

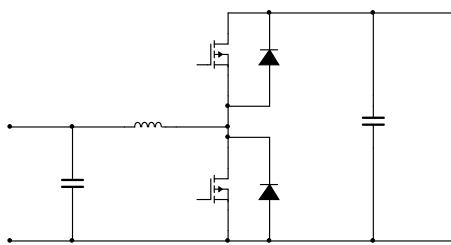
DC-DC hakkurin jälkeen tulee energiavarasto, johon haluttu energia varastoidaan. Edellisessä kappaleessa tarkasteltiin energiavarastoja ja niiden ominaisuuksia. Eri energiavarastoja voidaan myös käyttää rinnakkain samassa sovelluksessa, jolloin saadaan molempien energiavarastojen hyvät ominaisuudet käyttöön (Rufer). Tässä työssä tutkitaan tapausta jossa akkuja ja superkondensattoreita käytetään rinnakkain.

Energiavarastoon varattu energia halutaan uudestaan käyttöön, jolloin energiavarastosta saatava tasajännite täytyy muuttua takaisin vaihtojännitteeksi. Tämä muutos toteutetaan DC-AC invertterillä. Yleisimmin käytetty invertteri on PWM -ohjattu (pulse width modulation) pulssimaista kanttiaaltoa lähtönsä tuottava invertteri. Invertteri voi olla aiemmin puhutun tasasuuntaajan kanssa samassa paketissa jolloin sitä kutsutaan taajuusmuuttajaksi. Invertteri ja tasasuuntaaja voi myös olla sama laite jolloin sitä kutsutaan invertteriksi tai tasasuuntaajaksi riippuen tehovirtauksen suunnasta.

Työkone- ja ajoneuvosovelluksissa invertterillä ohjataan moottoria. Tämä moottori on yleisimmin induktiomoottori tai kestopmagnetoitu tahtikone (Immonen 2008).

3.1 DC-DC hakkurit

DC-DC -hakkuritopologioita on olemassa lukuisia esimerkiksi buck-boost -hakkuri, flyback -hakkuri, kokosiltahakkuri ja puolisiltahakkuri. Käytännön sovelluksissa yleisimmin käytetty hakkuritopologia on kaksisuuntaisen tehovirtauksen mahdollistava buck-boost hakkuri, kuvasta 3.2 voidaan nähdä tämän kytkentä. (Krishnamachari 2002)



Kuva 3.2. Kaksisuuntaisen tehovirtauksen mahdollistavan Buck-boost -hakkurin kytkentä.

Buck-boost -hakkuria voidaan kutsua myös inverttoivaksi hakkuriksi, koska sen lähtöjännitteen napaisuus on vastakkainen tulojännitteen napaisuuteen. Tämä napaisuus voidaan kääntää kytkemällä lähdössä olevan kondensaattorin negatiivinen napa kuormana olevan laitteen maadoitukseen. Buck-boost -hakkurin hyötysuhteeksi voidaan saada yli 90 % (Reiman 2002). Ideaalisilla komponenteilla rakennetussa hakkurissa tulo- ja lähtöjännitteen suhde lähenee ääretöntä. Todellisessa hakkurissa olevista passiivisista elementeistä johtuen lähtö- ja tulojännitteen suhde ei voi nousta yli kolminkertaiseksi. (Mohan 2008)

3.2 Taajuusmuuttajat

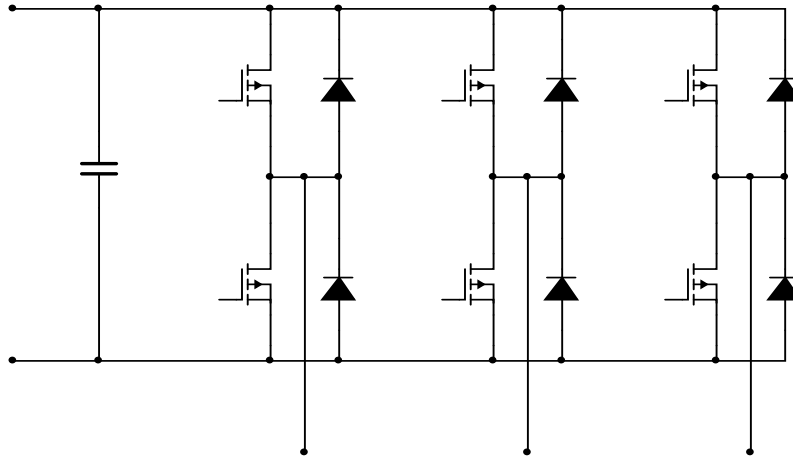
Tässä kappaleessa tarkastellaan jännitevälipiirillisten AC-DC-AC taajuusmuuttajien ominaisuuksia. Työssä käytetään taajuusmuuttajaa kaksisuuntaisesti eli energian syöttämiseksi energiavarastosta AC -verkkoon sekä energiavarastojen lataamiseen AC -verkosta. Työssä olisi tarkoitus käsitellä tapausta jossa energiavarastot kytketään kuormaan pelkän DC-AC invertterin avulla, tämä voidaan nähdä kuvasta 3.3. Tällä pelkän invertterin käytöllä saadaan parannettua kokonaishyötysuhdetta ja vähentämään komponenttien määrää järjestelmässä.



Kuva 3.3. Energiavaraston kytkeminen AC -verkkoon pelkällä DC-AC invertterillä.

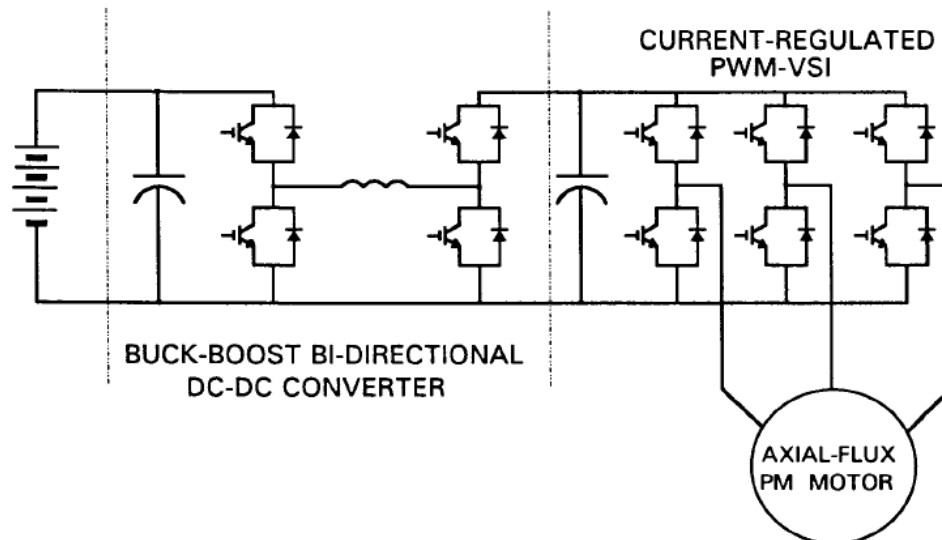
3.2.1 Invertteritopologiat

Invertteritopologioita on monia esimerkiksi push-pull-, puoliaalto- ja kokoaaltoinvertteri (Mohan 2008). Yleisimmin käytetty topologia on kolmivaiheinen kokoaaltoinvertteri, jonka periaatekytkentä voidaan nähdä kuvasta 3.4



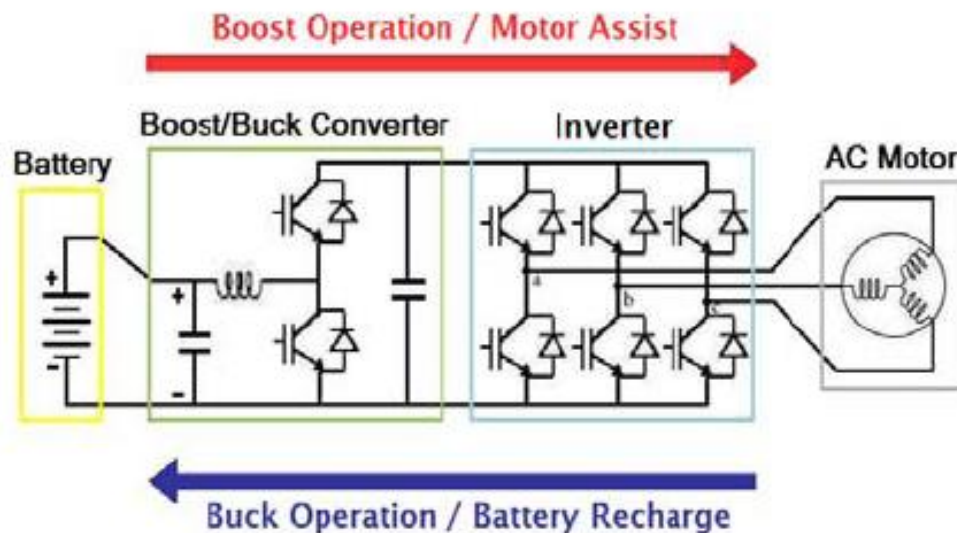
Kuva 3.4. Kolmivaiheisen DC-AC kokoaaltoinvertterin periaatekytkentä.

Jotta DC-DC hakkuritopologiat ja DC-AC –invertteritopologiat eivät jäisi vain erillisiksi osiksi, on kuvissa 3.5-3.7 käytännön sovelluksista piirikaavioita. Kuvassa 3.5 on esimerkki piirikaavio sähköautosta. Kuvassa on akkumoduuli, kaksisuuntaisen tehonvirtauksen mahdollistava buck-boost DC-DC hakkuri, kolmivaiheinen DC-AC kokoaaltoinvertteri ja kestopagneettimoottori.



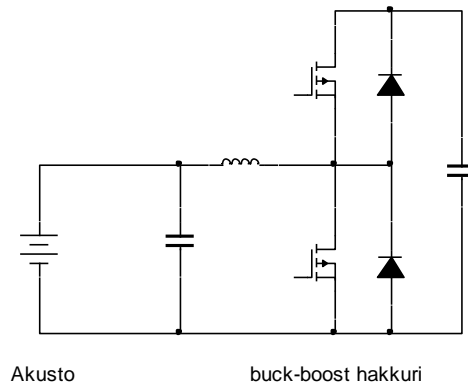
Kuva 3.5. Piirikaavio käytännön sähköautosta (Caricchi 2002).

Kuvassa 3.6 on esimerkki piirikaavio hybridiautosta. Kuvassa on akkumoduuli, jonka jännite on 192 V, kaksisuuntaisen tehonvirtauksen mahdollistava boost-buck DC-DC hakkuri joka nostaa akkumoduulilta saatavan 192 V jännitteen 380 V, kolmivaiheinen DC-AC kokoaaltoinvertterti ja epätahtikone jonka nimellisjännite on 265 V. (Asimakopoulos 2010).



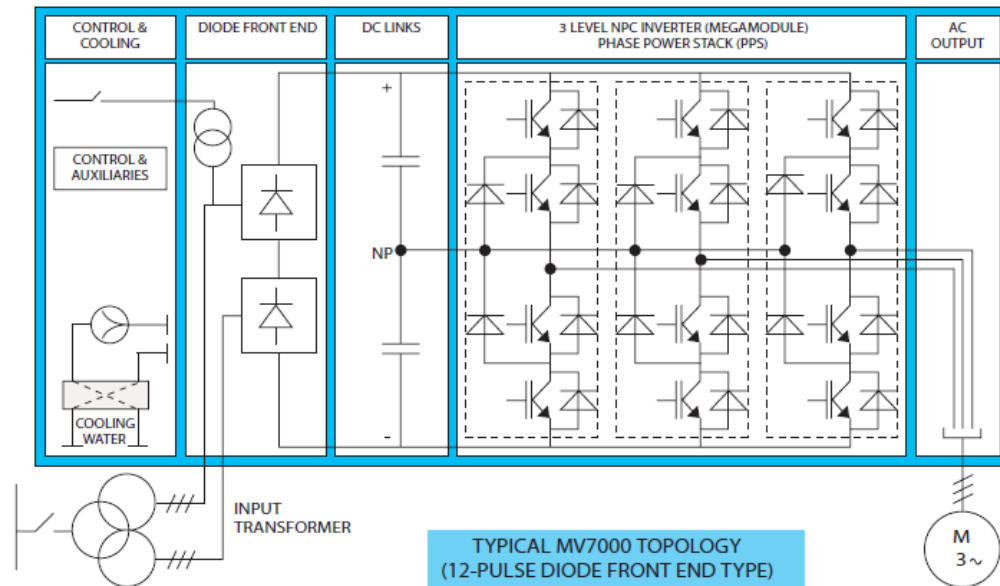
Kuva 3.6. Piirikaavio konkreettisesta hybridiautosta (Asimakopoulos 2010).

Edellisissä kuvissa oli piirikaavioita sähkö- ja hybridiautoista, mutta samat kuvat voisivat olla myös työkonesovelluksista, joissa periaatteet ovat aivan samat. Kuvissa 3.7 ja 3.8 on esimerkki piirikaaviot, joita voitaisiin käyttää laivoissa avustamaan dieselkoneita. Tämän järjestelmän ideana on saada leikattua dieselkoneiden päästöjä satamien läheisyydessä, jossa tiukentuneet päästörajoitukset aiheuttavat ongelmia. Kuvassa 3.7 on akkumoduuli ja kaksisuuntaisen tehonvirtauksen mahdollistava buck-boost DC-DC hakkuri. (Breucker 2009).



Kuva 3.7. Akkumoduuli ja DC-DC buck-boost hakkuri.

Kuvassa 3.8 on Convertteam:in valmistaman taajuusmuuttajan piirikaavio, joka sopisi käytettäväksi laivoissa niiden tarvitsemille suurille tehoille. Kuvassa 3.7 ollut akkumoduuli ja DC-DC hakkuri kytkentä liitetään taajuusmuuttajan välipiiriin. (Breucker 2009).

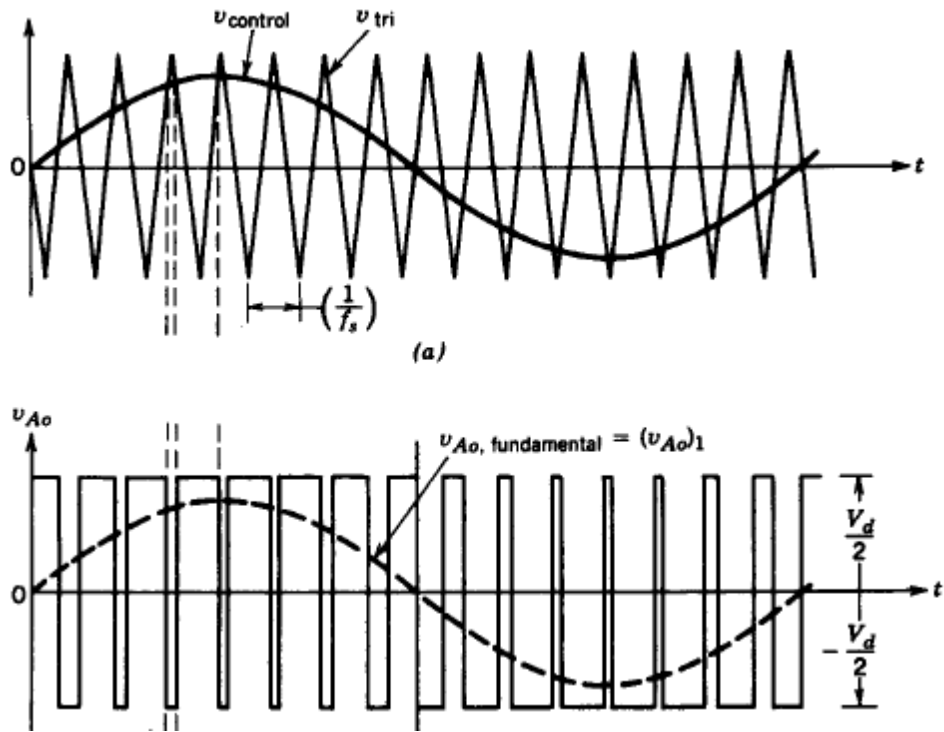


Kuva 3.8. Convertteam:in valmistaman taajuusmuuttajan piirikaavio (Convertteam 2007).

3.2.2 DC-AC invertterien vertailua

Tyypillisesti invertterit jaotellaan kantiaaltoinverttereihin ja PWM-inverttereihin. Kantiaaltoinvertteri on helppo toteuttaa ja se tuottaa lähtönsä kantiaaltoa. Kaikki laitteet eivät toimi kantiaalto-invertterillä, koska se ei tuota varsinaisesti mitään siniaaltoa, jolla laitteet on suunniteltu toimimaan. Modifioitu kantiaalto-invertteri tuottaa lähtönsä kantiaallon, josta on leikattu paloja pois, jolloin se muistuttaa siniaaltoa.

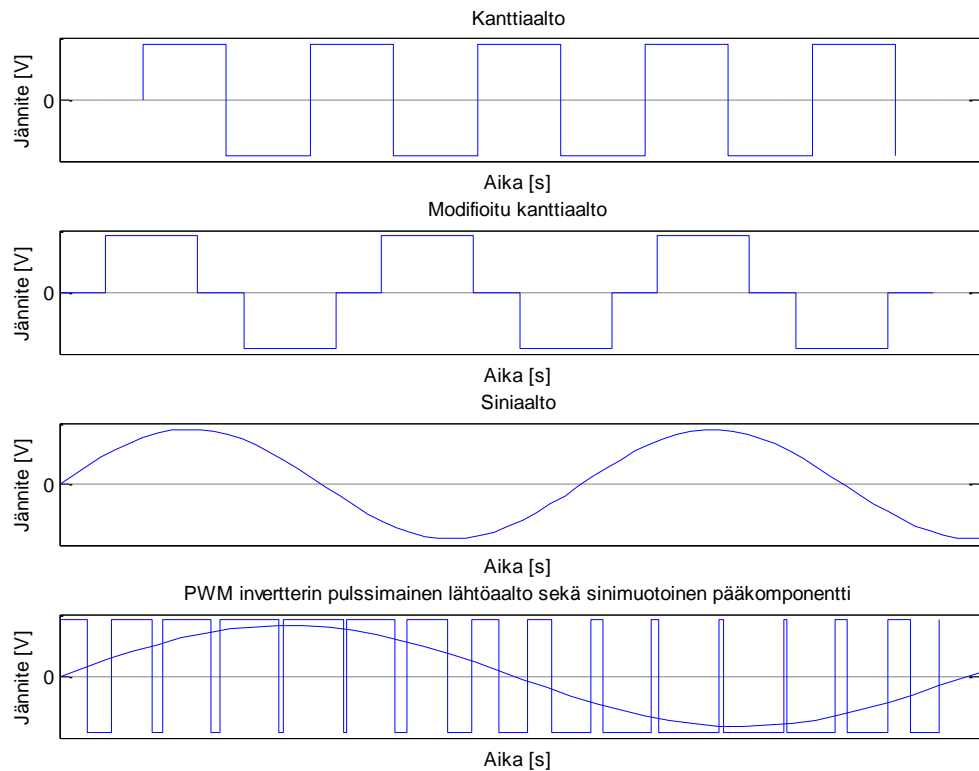
Yleisimmin nykyään käytetty invertterityyppi on PWM eli pulse width modulation invertteri. PWM tarkoittaa invertterin ohjaustapaa eli lähtöjännitteen pulssin leveyden säätämistä. PWM invertterissä verrataan sisään menevää siniaaltoa ja kolmioaaltoa toisiinsa, riippuen siitä kumpi jänniteaalto on suurempi, kytketään eri kytkimiä päälle ja pois. Tästä kytkimien kytkemisestä päälle ja pois muodostuu invertterin lähtöön kantiaallon palasista koostuva pulssijono, joka muistuttaa siniaaltoa. Lähtevän siniaallon amplitudia sekä taajuutta voidaan säätää halutuksi. PWM-invertterin aaltomuodot voidaan nähdä kuvasta 3.9



Kuva 3.9. PWM invertterin tulo-, vertailu- ja lähtöaallon muodot (Mohan 2008, s.204).

Kuvassa on invertterille tuotavaa sinimuotoista vertailusignaalia merkitty v_{control} , tämän signaalin taajuus määrää ulostulosignaalin taajuuden. Tätä sinisignaalia verrataan sisään tulevaan kolmioaaltoon v_{tri} . Kolmioaallon taajuus on sama kuin invertterin kytkimien kytkentätaajuus. Kun kolmioaallon amplitudi on suurempi kuin siniaallon niin lähtösignaali on minimiarvossaan ja kun kolmioaalto on pienempi kuin siniaalto niin lähtösignaali on maksimissaan. Alemmasta koordinaatistosta nähdään pulssimaista kanttiaaltoa muistuttava todellinen lähtösignaali sekä lähtösignaalin pääkomponentti, joka muistuttaa siniaaltoa. Sinimuotoista muistuttavan lähtösignaalin seassa on myös jonkin verran harmonisia, jotka ovat pääaallon moninkertoja.

Kuvassa 3.10 on kuvattu erilaisia inverttereihin liittyviä käyrämuotoja (Mohankumar 2010), (Mohan 2008).



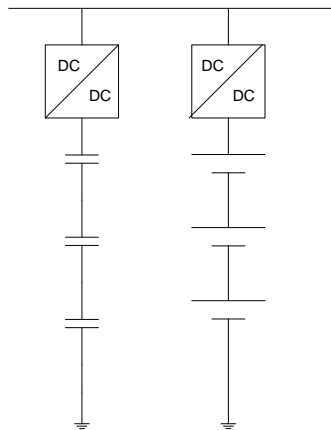
Kuva 3.10. Inverttereihin liittyviä käyrämuotoja.

3.3 Eri rinnankytkentävaihtoehtoja

Tarkastellaan eri vaihtoehtoja energiavarastojen kytkemiseksi DC- ja AC verkkoon. Tavoitteena on saada kytkettyä mahdollisimman vähällä tehoelektroniikalla ja mahdollisimman korkealla hyötysuhteella.

3.3.1 DC-DC kytkentä

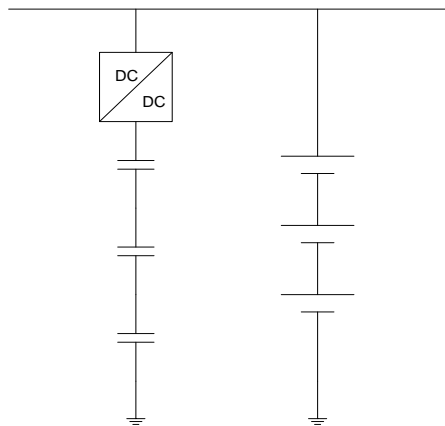
Esimerkiksi tasasähkömoottoreilla varustetussa sähköautossa tai laivassa, jossa on tasasähköjärjestelmä, energiavarastot voidaan joutua kytkemään tasasähköverkkoon, mikä on periaatteessa kaikkein yksinkertaisin vaihtoehto. Käydään läpi vaihtoehto jossa on akkumoduuli ja superkondensaattorimoduuli rinnankytkettynä. Superkondensaattorimoduuli tarvitsee DC-DC hakkurin rajoittamaan latausvirtaa ja pienentämään superkondensaattorien jännitteen heilumista kuormituksen muuttuessa, sekä muuta tehoelektronikkaa tarkkailemaan yksittäisten kondensaattorien jännitettä. Akkumoduuli ei välttämättä tarvitse DC-DC hakkuria, koska latausvirtaa ei tarvitse rajoittaa eikä akkujen jännitteen heiluminen kuormituksen mukaan haittaa, joten kytkentävaihtoehtoja on kolme. Nämä kytkennät voidaan nähdä kuvista 3.11, 3.12 ja 3.13. Kuvassa 3.11 on perinteinen tapa kytkeä akkujen ja superkondensaattoreiden rinnankytkentä DC-verkkoon.



Kuva 3.11. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkentä DC-verkkoon kahdella DC-DC hakkurilla.

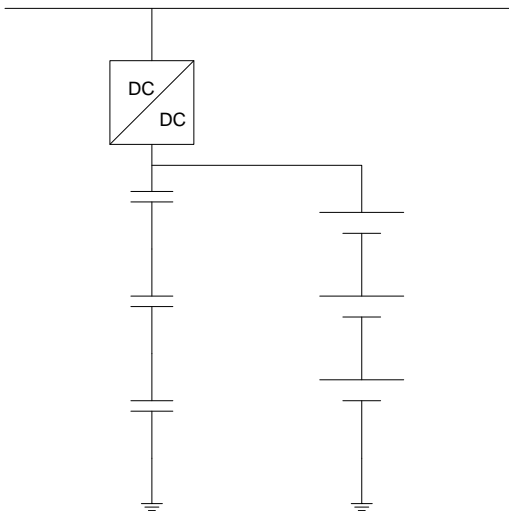
Sekä akuilla että superkondensaattoreilla on oma DC-DC hakkurinsa. Tässä kytkennässä akku- ja superkondensaattorimoduulien jännitetasot voidaan valita vapaasti, tietyissä rajoissa, eivätkä kummankaan moduulin jännitteet riipu verkon kuormituksesta. Kahden DC-DC hakkurin käyttö taas huonontaa kokonaishyötysuhdetta huomattavasti, joten tästä kytkentämallista pyritään pääsemään eroon hyötysuhteen nostamiseksi.

Kuvassa 3.12 superkondensaattorimoduuli on kytketty DC-DC hakkurin kautta verkkoon ja sen jännite voidaan valita, mutta akkumoduuli on kytketty suoraan verkkoon joten sen jännitetaso täytyy olla sama kuin verkossa ja se vaihtelee verkon kuormituksen mukaan. Edelliseen kytkentään verrattuna hyötysuhde on parantunut huomattavasti toisen DC-DC hakkurin jäädessä pois.



Kuva 3.12. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkentä DC-verkkoon yhdellä DC-DC hakkurilla.

Kuvan 3.13 tapauksessa superkondensaattorimoduulilla ja akkumoduulilla täytyy olla sama jännite koska ne ovat molemmat kytketty samaan DC-DC hakkuriin. Moduulien jännite voi kuitenkin olla pienempi kuin verkon jännite. Edelliseen kytkentään verrattuna hyötysuhde on sama.



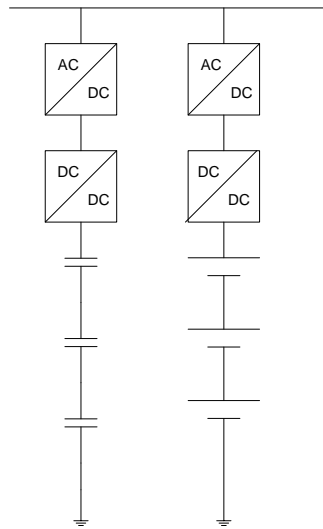
Kuva 3.13. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkentä DC-verkkoon yhdellä DC-DC hakkurilla.

Tämä kytkentä on kaikkein tärkein kytkettäessä energiavarastoja DC -verkkoon, jotta saataisiin mahdollisimman korkea kokonaishyötysuhde. Superkondensaattorimoduulissa täytyy olla itsessään jokin suojapiiri, joka tarkkailee yksittäisten kondensaattorien jännitettä, pitäen kaikkien jännitteen samana, jos moduulissa on yli kolme superkondensaattoria.

Kuormitustilanteissa nopeat kuormituspiikit otetaan superkondensaattorimoduulista ja kuormituksen tasaantuessa akkumoduuli alkaa syöttää tehoa verkkoon. Lataustilanteessa hakkurilla täytyy rajoittaa latausvirtaa superkondensaattorimoduulin vaatimalle tasolle.

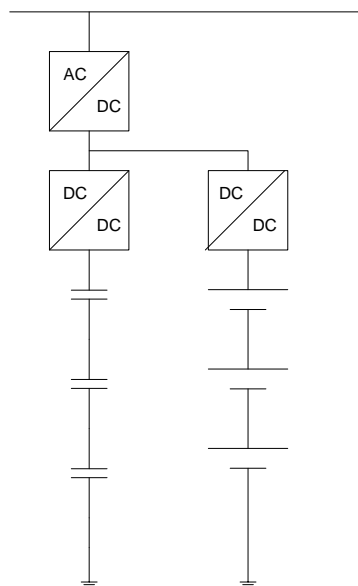
3.3.2 DC-AC kytkentä DC-DC hakkurilla

Yleisimmin energiavarastot kuitenkin kytketään AC verkkoon, jolloin tarvitaan DC-AC invertteriä muuttamaan energiavarastosta saatava DC jännite AC jännitteeksi. Tähänkin löytyy useita kytkentävariaatioita. Kuvista 3.14–3.16 nähdään kytkennät joissa on sekä DC-AC invertteri että DC-DC hakkuri. Kuvassa 3.14 akkumoduuli sekä superkondensaattorimoduuli on kytketty omilla DC-DC hakkureilla ja inverttereillä verkkoon.



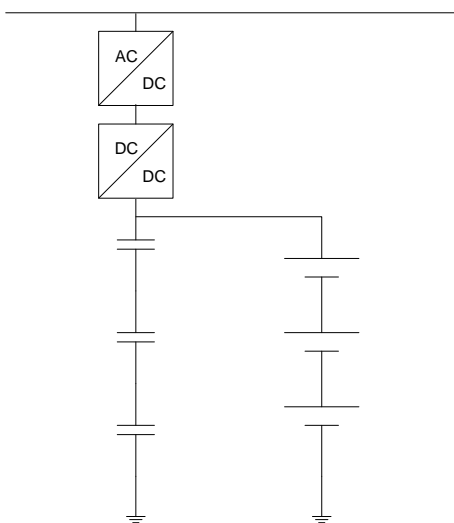
Kuva 3.14 Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkeminen verkkoon omilla inverttereillä ja hakkureilla.

Kuvan 3.14 kytkentä antaa laajat mahdollisuudet valita energiavarojen jännitetasot. Tämä kytkentä on kuitenkin erittäin vähän käytetty, johtuen turhasta kahden invertterin kytkennästä. Kytkentään riittäisi yksikin invertteri, jolloin myös hyötysuhde on parempi kuin edellisessä kytkennässä. Tällainen kytkentä voidaan nähdä kuvasta 3.15.



Kuva 3.15. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkeminen verkkoon yhdellä invertterillä ja kahdella hakkurilla.

Kuvan 3.15 kytkennässä akkumoduulin ja superkondensaattorimoduulin jännitteet voivat olla erisuuret, johtuen erillisistä hakkureista. Kokonaishyötysuhde on kuitenkin tässäkin tapauksessa melko huono johtuen siitä että, suurin osa häviöistä järjestelmässä aiheutuu DC-DC hakkurissa, sen hyötysuhteen ollessa parhaimmillaankin vain 90 % luokkaa. Kuvassa 3.16 on kytketty akkumoduuli ja superkondensaattorimoduuli yhden DC-DC hakkurin ja yhden invertterin kautta verkkoon.

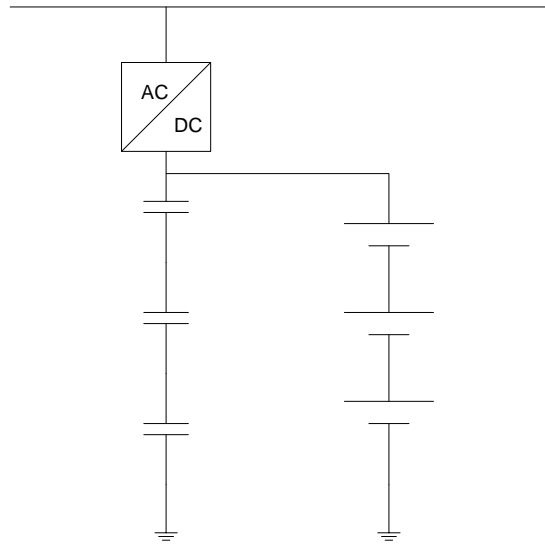


Kuva 3.16. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkeminen verkkoon yhdellä invertterillä sekä hakkurilla.

Edelliseen kytkentään verrattuna hyötysuhde on parantunut huomattavasti toisen DC-DC hakkurin jäädessä pois. Nyt akku- ja superkondensaattori moduuleilla täytyy olla sama jännite, koska ne on kytketty samaan DC-DC hakkuriin. Tässä kytkennässä saadaan pidettyä taajuusmuuttajan välipiirin jännite vakiona, mutta DC-DC hakkurin käyttö laskee kokonaishyötysuhdetta. Seuraavassa kappaleessa tarkastellaankin kytkentää jossa ei ole käytetty ollenkaan DC-DC hakkuria. Nykyisissä sovelluksissa pyritään maksimoimaan hyötysuhdetta joten seuraava kytkentä on tärkeä tulevaisuutta ajatellen.

3.3.3 DC-AC kytkentä pelkällä invertterillä

Kaikkein tärkein tapaus tässä työssä on kun käytetään pelkästään DC-AC invertteriä ja kytketään akkumoduulin ja superkondensaattorimoduulin rinnankytkentä suoraan taajuusmuuttajan välipiiriin. Tämä kytkentä voidaan nähdä kuvasta 3.17

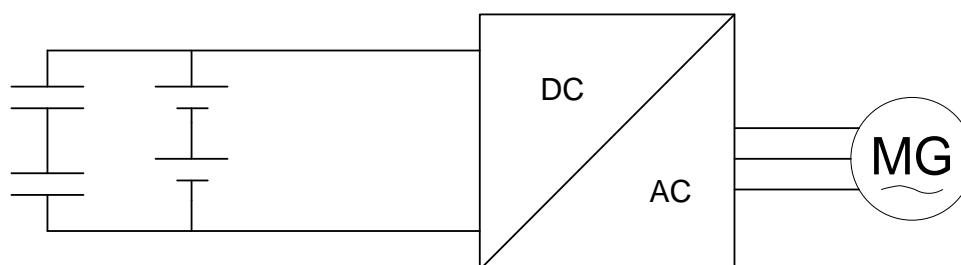


Kuva 3.17. Akkujen ja superkondensaattoreiden kytkentä pelkällä invertterillä.

Tässä kytkennässä on minimoitu tehoelektroniiikan tarve jolloin saadaan kasvatettua kokonaishyötysuhdetta. Ongelmaksi voi tulla välipiirin jännitteen heiluminen energiavarojen varauksen mukaan. Myös akkumoduulin ja superkondensaattorimoduulin keskinäinen latautuminen ja purkautuminen voi olla ongelma. Kun superkondensaattorimoduuli on kytketty suoraan akkumoduulin kanssa rinnan ilman DC-DC hakkuria, muodostuu niiden välille transientteja virtoja, jotka ovat haitaksi (Pay 2003). Koska energiavarojmoduuleilla ei ole erillisiä lataussuuntaajia niiden varautuminen ja purkautuminen vaihtelee suoraan kuormituksen muuttuessa. Superkondensaattori- ja akkumoduulin virrat jakautuvat suoraan moduulien jännitteiden ja sisäresistanssien tulojen suhteessa.

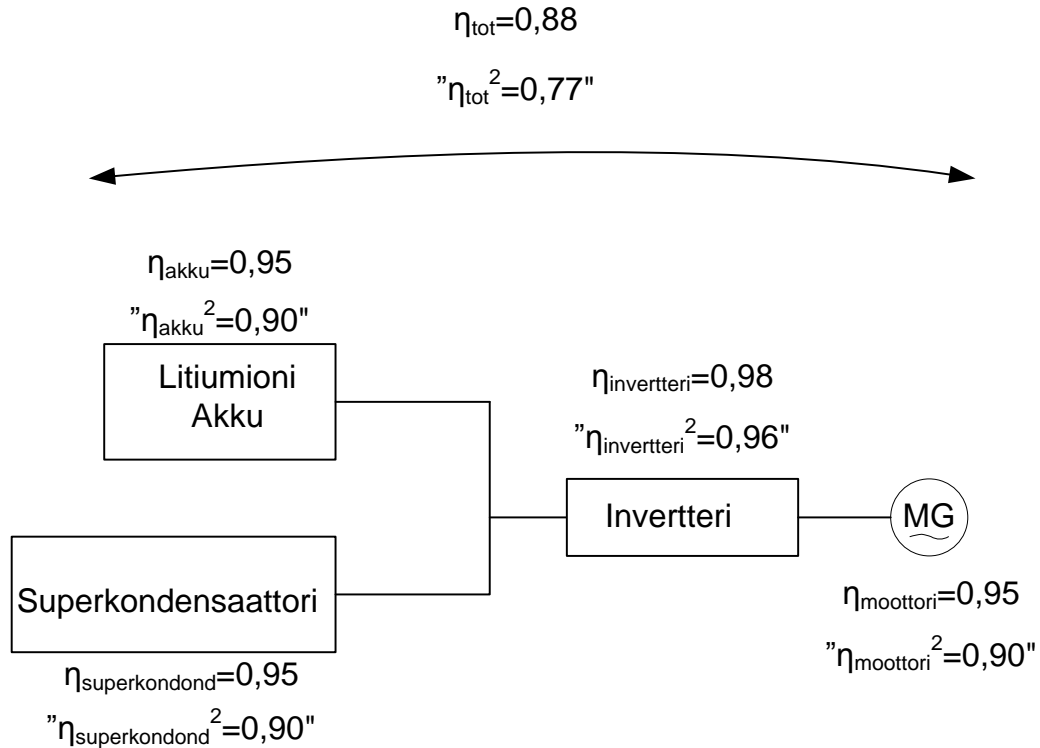
3.4 Esimerkkitapaus

Otetaan tarkempaan tarkasteluun esimerkkitapaus, jossa on akkumoduulin ja superkondensaattorimoduulin rinnankytkentä. Tässä esimerkkitapauksessa käytetään litium-ioniakkuja, koska niillä on suuret energia- ja tehotehiheydet sekä hyvä hyötysuhde.. Energiavarastot on kytketty suoraan yhteen DC-AC invertteriin, joka ohjaa moottoria. Tämä kytkentä voidaan nähdä kuvasta 3.18



Kuva 3.18 Akkujen ja superkondensaattoreiden rinnankytkentä pelkällä invertterillä moottoriin.

Kytkentä kuvaa esimerkiksi työkoneen hybridijärjestelmää, jossa dieselkonetta on pienennetty ja rinnalle on laitettu sähkömoottori avustamaan. Tässä kytkennässä tavoitellaan mahdollisimman korkeaa hyötysuhdetta, joten käytetään pelkästään yhtä invertteriä eikä ollenkaan DC-DC hakkuria. Komponentteja mitoittaessa täytyy tietää järjestelmän jännitetasot sekä tarvittavat tehot. Sähköautoissa tyypillisesti akkujen jännite on 200–300 V ja moottorin jännite 200–600 V (Plesko 2009), (Kawahashi 2004). Työkoneissa voidaan käyttää esimerkiksi 650 V järjestelmää (Lehmuspelto 2009). Sähkömoottorin teho on tyypillisesti hybridikoneissa joitain kymmeniä kilowatteja (Lehmuspelto 2009). Energiavarastoja valittaessa tulee ottaa myös huomioon taloudelliset näkökohdat eli täytyy miettiä energiavarastojen hintaa sekä niiden elinkaarikustannuksia. Järjestelmän kokonaishyötysuhde on suunnittelun pääajatuksena. Kokonaishyötysuhde koostuu osakomponenttien hyötysuhteiden tulona, kuva 3.19



Kuva 3.19. Osakomponenttien ja kokonaissysteemin hyötysuhteet, kun on oletettu hyötysuhteiden olevan samat lataus- ja purkusuunnassa.

Kuvan osoittamassa järjestelmässä on useita kysymyksiä herättäviä ongelmakohtia. Kun akkumoduulit ja superkondensaattorimoduulit on kytketty rinnakkain ilman DC-DC hakkureita, niiden jännitteet muuttuvat varauksien mukaan. Tyypillisesti superkondensaattorien jännitteet laskevat melko nopeasti varauksen purkautuessa, joten rinnankytkennästä saatava jännite myös laskee. DC-DC hakkurin puuttuessa akkujen ja superkondensaattorien välille muodostuu transientteja virtoja, jotka kuormittavat akkua ja lyhentävät sen elinikää (Pay 2003).

Energiavarastojen latausvaiheessa moottori toimii generaattorina ja syöttää tehoa invertterille päin. Invertteri muuttaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi ja syöttää sitä välipiiriinsä kytkettyihin akkuihin ja superkondensaattoreihin. Latausteho jakaantuu kytkennässä mielivaltaisesti akkuihin ja superkondensaattoreihin. Superkondensaattoreita on paljon sarjassa, joten tarvitaan jokin suojapiiri tarkkailemaan yksittäisten superkondensaattoreiden varausta, tämä suojaus on toteutettu suoraan

superkondensaattori moduuleissa. Ladattaessa tyhjiä superkondensaattoreita pitää latausvirran suuruutta myös rajoittaa. Tämä virranrajoitus voidaan toteuttaa invertterillä. Koska tässä esimerkissä käytetään litium-ioniakkuja, tarvitaan jokin suojapiiri myös tarkkailemaan akkujen latautumista ja estämään yllilatautuminen.

DC-DC hakkurin puuttuessa myös energiavarastojen purkausvaiheessa tehovirtauksen jakautuminen eri energiavarastoille on vapaata. Kuitenkin nopeiden tehopiikkien tullessa käytännössä kaikki teho otetaan superkondensaattoreista johtuen niiden ominaisuuksista. DC-DC hakkurin puuttuessa myös superkondensaattorien purkaustilanteen virtoja voidaan joutua rajoittamaan, mutta tämä rajoitus voidaan toteuttaa samalla latausvirran rajoituksen kanssa. Superkondensaattoreiden pienestä energiatiheudesta johtuen tehotarpeen jatkuessa tehoa alkaa virrata myös akkumoduuleista ja pikkuhiljaa kaikki tehovirtaus tulee akuista.

4 YHTEENVETO

Tässä kandidaatin työssä tutkittiin erilaisia energiavarastoja, joita voidaan käyttää ajoneuvosovelluksissa. Tutkittiin erityyppisiä akkuja, superkondensaattorit, SMES, vauhtipyörät ja paineakut. Kuitenkin pääpaino oli litiumakuissa ja superkondensaattoreissa.

Energiavarastojen lisäksi tutkittiin niiden verkkoon liittämistä. Verkkoon liittamisestä tutkittiin sekä DC- ja AC verkkoon liittäminen. Verkkoon liittämiseen kuuluu erilaiset DC-DC hakkurit, tasasuuntaaja/vaihtosuuntaaja ja itse verkko tai moottori. Näissä verkkoon liittämisissä pyrittiin minimoimaan tehoelektroniikan tarve, jolloin kokonaishyötysuhde saadaan mahdollisimman korkeaksi. Eli tärkeimpänä tapauksena oli yhdellä DC-DC hakkurilla kytkeminen DC verkkoon ja pelkällä yhdellä invertterillä kytkeminen AC verkkoon.

Tarkempaan tarkasteluun otettiin esimerkkitapaus, jossa on litiumioniakut ja superkondensaattorit kytketty rinnakkain suoraan invertteriin, jolla ohjataan moottoria. Esimerkkitapauksessa on tehoelektroniikan tarve pyritty minimoimaan hyötysuhteen maksimoimiseksi. Käytettäessä pelkkää yhtä invertteriä eikä ollenkaan DC-DC hakkuria saadaan mahdollisimman korkea hyötysuhde, mutta siinä saattaa aiheuttaa ongelmia invertterin tulojännitteen heiluminen energiavarastojen varauksen mukana, sekä energiavarastojen keskinäinen käyttäytyminen lataus sekä purkaus tilanteessa.

LÄHTEET

- (Active Power 2007) Active Power. *Flywheel Technology*. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.9.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.activepower.com/fileadmin/images/flywheel.jpg>
- (Alanen 2003) R. Alanen, T. Koljonen, S. Hukari, P. Saari. *Energian varastoinnin nykytila*. VTT 2003. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.6.2010]. Saatavissa osoitteessa <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>
- (Altairno) Altairno. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.altairnano.com/profiles/investor/fullpage.asp?f=1&BzID=546&to=cp&Nav=0&LangID=1&s=0&ID=10702>
- (Asimakopoulos 2010) Asimakopoulos, A.P. Boumis, B.T. Patsias, C.E. Safacas, D.A. Mitronikas, E.E.; International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2010; Publication Year: 2010; Pages: 1040-1045; *Experience derived from the Conversion of a Conventional Car to a Hybrid Electric Vehicle – Analysis of the Powertrain*. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.9.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5542277>
- (Atbatt 2008) *Lithium Titanate Battery*. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.atbatt.com/blog/65.asp>
- (Breucker 2009) De Breucker, S. Peeters, E. Driesen, J.; Electric Ship Technologies Symposium, 2009. ESTS 2009. IEEE; Publication Year 2009; Pages: 310-317; *Possible applications*

of Plug-in Hybrid Electric Ships. [verkkodokumentti].

[viitattu 29.9.2010] Saatavissa osoitteessa

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4906530&tag=1>

(Buchmann 2003)

I. Buchmann. *What's the best battery?* Battery university.

[verkkodokumentti]. [viitattu 30.6.2010]. Saatavissa

osoitteessa <http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>

(Burke 2009)

Burke. A, Miller. M; 06-01-2009. Institute of Transportation Studies, UC Davis. *Performance Characteristics of Lithium-ion Batteries of Various Chemistries for Plug-in Hybrid Vehicles*. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.9.2010] Saatavissa

osoitteessa

<http://www.escholarship.org/uc/item/3mc7g3vt?display=all#page-1>

(Cap-xx 2008)

CAP-XX Supercapacitor Nanotechnology Construction. Cap-xx. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.7.2010] Saatavissa

osoitteessa

<http://www.cap-xx.com/news/photoarchive.htm>

(Caricchi 2002)

Caricchi, F. Crescimbin, F. Di Napoli, A.; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1995. APEC '95.

Conference Proceedings 1995., Tenth Annual; Publication

Year: 1995, Pages:887-892 vol.2. *20kW Water-Cooled*

Prototype of a Buck-Boost Bidirectional DC-DC Converter Topology for Electrical Vehicle Motor Drives.

[verkkodokumentti]. [viitattu 29.9.2010] Saatavissa

osoitteessa

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=469045>

- (Converteam 2007) Datasheet: Converteam MV7000. [verkkodokumentti].
[viitattu 29.9.2010] Saatavissa osoitteessa
http://www.converteam.com/converteam/1/doc/News/070712_Converteam_MV7000.pdf
- (Electropedia 2005) Lead Acid Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.8.2010]
Saatavissa osoitteessa
<http://www.mpoweruk.com/history.htm#niaudet>
- (Green 2002) A. Green, C. Jehoulet. Publication Year 2002. *The non-battery battery – the potential role of supercapacitors in standby power applications*. Greenpaper. [verkkodokumentti].
[viitattu 9.8.2010] Saatavissa osoitteessa
<http://www.battcon.com/PapersFinal2002/GreenPaper2002.pdf>
- (Immonen 2008) Immonen Paula, *Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi*. Diplomityö, LUT.
[verkkodokumentti]. [viitattu 29.6.2010]. Saatavissa osoitteessa
<https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/43937/nbnfi-fe200902241199.pdf?sequence=3>
- (IMO 2008) IMO. MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE, 58th session, Agenda item 23, Publication Year: 2008. *REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENTAL PROTECTION COMMITTEE ON ITS FIFTY-EIGHTH SESSION*. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa
http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D24249/revisedannexviandnoxcodemepc5823-Add-1.pdf

- (Joshi 2006) Joshi, R.P. Deshmukh A.P.; Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICEHV '06. IEEE Conference on; Publication Year: 2006; Pages: 1-6; *Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution*. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4156562>
- (Jurkelo 2006) I. Jurkelo. *Advantages and disadvantages of supercapacitor*. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa <http://e-articles.info/e/a/title/Advantages-and-Disadvantages-of-Supercapacitor/>
- (Kawahashi 2004) Kawahashi, A.; Proceedings of 2004 The 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, ISPSD '04.; Publication Year:2004; Pages: 23-29; *A New-Generation Hybrid Electric Vehicle and Its Supporting Power Semiconductor Devices*. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1332845&tag=1>
- (Krishnamachari 2002) Krishnamachari, B. Czarkowski, D.; Circuits and Systems, 1998. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on; Publication Year: 1998; Pages: 446-449 vol.6; *Bidirectional buck-boost converter with variable output voltage*. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=705307>

- (Kämäräinen 2008) J. Kämäräinen. Merenkulkulaitos *AJANKOHTAINEN KANSAINVÄLINEN SÄÄDÖSTILANNE*. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa [http://www.shortsea.fi/demo/images/pdf/Uutisarkisto/Kamara inen-040608.pdf](http://www.shortsea.fi/demo/images/pdf/Uutisarkisto/Kamara%20inen-040608.pdf)
- (Lehmuspelto 2009) T. Lehmuspelto, M. Heiska, A. Leivo, A. Hentunen. World Electric Vehicle Journal Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - 2009 *AVERE. Hybridization of a Mobile Work Machine*. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.8.2010] Saatavissa osoitteessa [http://www.evs24.org/wevajournal/php/download.php?f=vol3 /WEVJ3-5890520.pdf](http://www.evs24.org/wevajournal/php/download.php?f=vol3/WEVJ3-5890520.pdf)
- (Maxwell 2010) Maxwell Technologies. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_K2_SERIES_1015370.pdf
- (Mohan 2008) N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power electronics: converters, Applications and Design, Media Enhanced Third Edition*, John Wiley & Sons. ISBN: 978-81-265-1090-0.
- (Mohankumar 2010) D. Mohankumar. *PWM inverter*, electroschematics.com. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.7.2010] Saatavissa osoitteessa <http://electroschematics.com/5865/pwm-inverter/>
- (Nesscap 2005) *PRODUCTS OF NESSCAP*. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.8.2010] Saatavissa osoitteessa http://www.nesscap.com/products_lineup.htm

- (Pay 2003) Pay, S. Baghzouz, Y.; Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna; Publication Year: 2003; Pages: 6 pp. Vol.3; *Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles*. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1304472&tag=1>
- (Plesko 2009) Plesko, H. Biela, J. Kolar, J.W.; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE; Publication Year: 2009; Pages: 164-170; *Novel Modulation Concepts for a Drive-Integrated Auxiliary Dc-Dc Converter for Hybrid Vehicles*. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4802650>
- (Reiman 2002) M. Reiman, *Teholähdepiirilevyn suunnittelu akkukäyttöiseen laitteeseen*. Diplomityö, LUT. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.7.2010] Saatavissa osoitteessa <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/35413/nbnfi-fe20021295.pdf?sequence=1>
- (Ruddell 2003) A. Ruddell. *STORAGE TECHNOLOGY REPORT*
ST6: FLYWHEEL. INVESTIRE. Thematic Network. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.7.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf>

- (Rufer) A.-Ch. Rufer, H. Ravokatrasolofo. *Static converter for complementary energy storage with battery and supercapacitor*. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.8.2010] Saatavissa osoitteessa http://leiwww.epfl.ch/publications/rufer_ravokatrasolofo_pcm_99.pdf
- (Thermoanalytics 2007) Thermoanalytics. *Battery types and characteristics*. [verkkodokumentti]. [viitattu 31.6.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.thermoanalytics.com/support/publications/batterytypesdoc.html>
- (Valtioneuvosto 2005) *Valtioneuvoston asetus polttomoottoreiden pakokaasu- ja hiukkaspäästöjen rajoittamisesta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta*. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.9.2010] Saatavissa osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=36418&lan=fi>
- (Zhang 2009) Zhang, H. Dou, H. Ren, J. Li, J. Zhang, H; PEDS2009; *Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in Wind/Photovoltaic Generation System*. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.8.2010] Saatavissa osoitteessa <http://ir.lib.ntust.edu.tw:8080/dspace/bitstream/987654321/14235/1/368.pdf>